

潮汐による河口の flow pattern の変化

柏 村 正 和*・吉 田 静 男**

1. 序 文

河口を出た淡水が海上にひろがる形式については、すでに何度も述べてきたように、密度流形式（A型）から噴流形式（E型）までの5種類に分類されている^{1)~3)}。これは実験室ばかりでなく、もちろん実際の河口においても認められているものである。ただしこの場合、潮汐による海面の上下動については考慮を払っていない。著者らの実測は、ほとんど日本海に面した石狩川、天塩川の河口でなされてきており、日本海は衆知のごとく潮差が小さく、海面の上下動を無視しても支障がなかったからに他ならない。しかし全国的にみると、日本海以外は通常潮差は大きく、ことに西日本諸海岸では潮汐の影響が絶大であることから見て、flow pattern が潮汐によりどのように影響を受けるかという問題は重要なものと考えられる。ことに近年、川から出る廃棄物の海水汚染が問題になっている折から、淡水のひろがりに関する知見は、ますますこれを伸ばす必要があるといえよう。

以上の観点に立って、昨年度から河口密度流におよぼす潮汐の影響について実験を開始している。しかし密度流の現象は、広く認識されているように、きわめて複雑な内容を持つものであって、潮汐実験開始以来日の浅い現在、その全容をきわめるにはまだほど遠いものがある。しかしある種のものについては興味ある結果がすでに得られている。すなわち潮汐によるいくつかの flow pattern や、その生成条件などである。潮汐が加わると、河道に潮流が発生し、これと淡水流下流量との相互作用によって流出状況はいろいろな形式をとる。河口内の淡塩二層の成層が強い場合は、漲潮期に下層海水が遡上しても、上層淡水は流出を続けるが、成層が弱い場合、つまり二層の混合が進行している場合には、同じ流下流量でも上層が逆流することがある。また流量が少ないと成層していても逆流する頻度が高くなるし、潮差を大きくすれば順流、逆流ともに発達する。さらに流下流量が少なくなり、同時に潮差と潮汐周期が大きくなると、しばしば淡水の流出は間欠的になり、puff 状を呈する。

以上のように、河口流出の面だけ見ても潮汐の影響は複雑に現われるのである。

今回は現在までの実験結果から認められた flow pattern の二、三の状況と、潮汐によって淡水流出が順流、逆流を示す条件などを中心にして述べてみたい。

2. 実験装置

従来から用いている河口流出実験用の水槽に若干の手をおしをして使用した。すなわち、3m, 2m の幅、奥行を持ち深さ 40cm のプラスチック水槽に、長さ 7m, 幅 8cm, 深さ 15cm の直線水路を直角にとりつけたものである。水槽には塩水を満たし、直線水路から淡水を流下せしめて、outlet からでるその flow-pattern を調べる。直線水路の底部には水槽から侵入した塩水が上流に向かって伸び、いわゆる塩水くさびを形成し、淡水はその上を流下する。淡水と海水を識別するために色素を用いる。通常塩水をローダミンBにて赤く着色し、淡水には11本の注射針から静かにフルオレッセンナトリウム溶液を注ぎこむ。これによって可視化された流線およびその変動を 8mm 撮影機にてとり、後1コマずつしらべて流速分布、あるいは flow-pattern の変化などを得ることができる。潮汐、つまり水面の上下運動をおこすために水槽の底部にビニール布を敷き、その下に別の水槽から淡水を流入、あるいは逆に排出せしめる。塩水と淡水をこのようにビニール布で遮断しているので、塩水中に流れや乱れが発生することなく、水路から出る淡水の流出状況を観察するのに好適である。潮汐を与えるための淡水の流出入には、それを駆動するポンプとバルブの操作によるのであるが、電動機でゆっくり回転する円板の縁にとりつけられたロッドの動きによって、それらが自動的に行なえるようになっており、水面の昇降にはほとんどひずみのない正弦波形で与えられる。水面に浮くフロートにとりつけられた板のたわみを抵抗線ひずみ計で検出することにより、刻々の水位が測定でき、同時に自記できる。しばしば表層塩分を測定する必要があり、そのため一對の小さな白金板をエポキシ樹脂のフレームにとりつけて対向せしめた電極を使用し、その間の電気伝導度をやはり自記できるようにしてある。これは逆流が極端になって生ずる間欠流の識別に用いられ、フロートにより常に outlet の表層に維持されるようになっている。

潮汐振幅(半潮差)、周期、淡水流量の3つの組み合わせ

* 正会員 理博 北海道大学教授 工学部

** 北海道大学助手 工学部

せにより種々の flow-pattern が得られるが、起潮装置はマルチパイプレーターとリレーの組み合わせを利用し、断続的に電流を流すことによって、ポンプ、バルブの操作をかなりゆっくりと変化させることができ、最大起潮能力は、振幅 8 cm のとき、周期約 6 分である。振幅を落とせばその分だけ周期をのばすことができる。

実験は、潮汐振幅の最小約 0.5 cm から最大 2.61 cm まで、周期最小 300 秒から最大 2 340 秒まで、また水路の淡水流量は最小 1.18 cc/s から最大 272 cc/s まで、かなり広範囲の変化を与え、あらゆる flow-pattern が得られるように数10回の実験をくり返した。しかし淡塩水の密度差 (ϵ に相当) を変化させてくり返すまでに達せず、今回は $\epsilon=0.02$ 前後でほぼ一定の場合だけになっている。この点は今後の実験に属する。

3. 結果について

潮汐によって海面が上下すると、定常状態のとき安定であった flow-pattern (A 型から E 型まで) は、潮汐の周期にあわせて変動し、潮差、周期に応じてさまざまな様相を呈する。たとえば潮差が小さいうちは定常状態とあまり変わらぬ pattern が生じ、潮汐にあわせてわずかに振動をする。潮差が大きくなるとしだいに pattern の変化が大きくなる。同時に周期を変えてみると、周期が短いほど pattern の変化は大きい。

今回の実験は潮汐のような長周期波のおよぼす影響を見るのが目的なので現象的にゆっくりしており、したがって水路内の水面はほとんど一様に潮汐と同一の位相で上下する。また河口部から潮汐による内部波が侵入するようなことも認められない。ただし塩水くさびの上流先端部が漲潮期に波うち、それが内部波を誘起して下流に伝わることや、また潮差が大きいときくさびが潮汐による前進と後退の間、一時静止する瞬間に、くさびの全長にわたって下層塩水が上層にまきあがる現象などが観察される。さらに河口部の両岸の角で、落潮期に内部波が発生して沖へ向かうこととか、漲潮期にはその部分に渦を生じ、両層が混合して水路に流入することがあるのも同時に観察されている。

一般に潮差が小さく、周期が大きいうちは、落潮期はもちろん、若干流速は落ちるが漲潮期にも表層淡水は水路を流下して、どの潮時にも順流を示す。しかししだいに潮差を大きくするか、周期を小さくしていくかすると、漲潮期には停流、あるいは逆流をするようになる。この傾向は淡水流量が小さいほど起こりやすい。さらに進行すると、落潮期に外へ出た淡水が漲潮期に水路へ戻らずに、代りに塩水が逆流するようになり、淡水は間欠流の形式になっていく。

多くの実験の中から二例を 図-1 と 図-2 に示す。

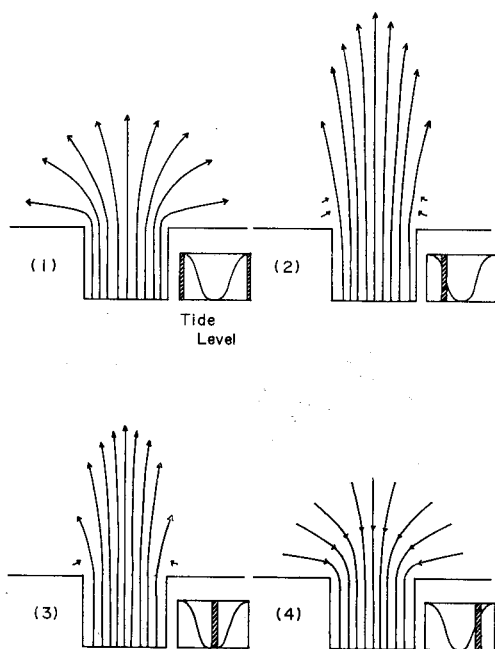


図-1 間欠流の流況の例

(1) 満潮 (2) 落潮

(3) 干潮 (4) 漲潮

$\theta=3.21 \times 10^{-1}$, $\lambda=3.49 \times 10^{-3}$

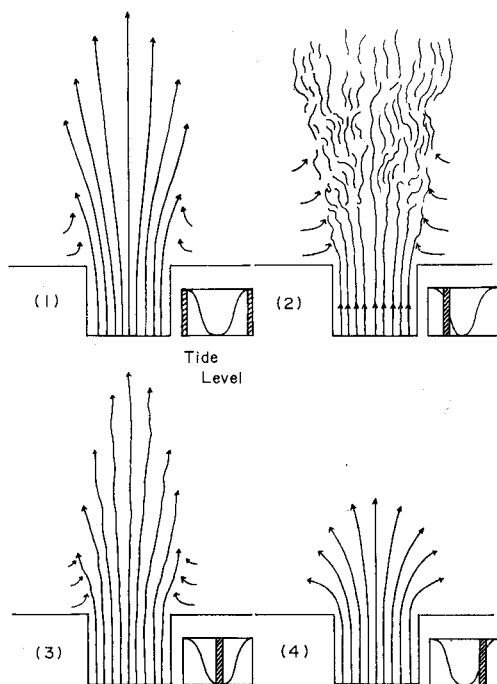


図-2 順流の場合の例

数字は 図-1 と同じ

$\theta=2.45 \times 10^{-1}$, $\lambda=4.95 \times 10^{-4}$

図—1 は、淡水流量 2.89 cc/s, 潮汐振幅 2.29 cm, 周期 360 秒, $\varepsilon=0.02$ における流況で、8mm フィルムから転写したものである。もし潮汐がなくて定常流であったとすると、この流量では A-pattern と B-pattern の境 ($\theta=0.321$, $R=1213$) 位の流況を示すはずのもので、かなり密度流的性格の濃い流れに相当する。(1) は満潮時で、きれいに放射状の流出を示している。(2) は落潮期で、流速は早くなり放射状からしだいに勢よく jet に移行していく。(3) は干潮期で、落潮期に似ているが流速が落ち、(4) の漲潮期には逆流を示している。ただしこの時の逆流水はほとんど塩水であって、淡水は沖で puff 状になって拡がっている。つまり 図—1 は間欠流の典型とみてよい。

図—2 は淡水流量 6.70 cc/s, 潮汐振幅 1.70 cm, 周期 1380 秒, $\varepsilon=0.018$ における流況である。定常なら B~C pattern を示すはずの流れ ($\theta=0.245$, $R=1577$) に相当する。(1) 満潮時にはすでに 2 次流をともしない、いわゆる C-pattern に似た流れで、(2) の落潮期には乱流 jet に似た流れになり勢いを増す。(3) の干潮時に乱れはかなりおさまるがやはり流れはかなり強い。(4) の漲潮期には流れはおそくなるが、やはり順流であって、A~B-pattern に似た流れになっている。この例は潮汐の存在にもかかわらず逆流せず、すべて順流である場合の典型である。

その他、数多くの実験には、この二つのタイプの間、つまり漲潮期に流れが停止するものとか、逆流時に淡水の一部が再び水路に戻るものとかがあるが、他はすべてこの 2 例と同じ経過をたどるのである。

以上流況についての解説を試みたが、それではこのような順流、逆流、間欠流を生ずるような条件は何かを考察し、実験結果をまとめる手法を考えることにする。

河口流出を二層モデルで考える場合の基礎方程式は、

$$\frac{\partial V_1}{\partial t} + (V_1 \cdot \nabla) V_1 = -gI - \frac{\tau_i}{\rho_1 h_1}$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \nabla \cdot (h_1 V_1) = 0$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial t} + (V_2 \cdot \nabla) V_2 = -gI + \varepsilon g \nabla h_1 + \frac{\tau_i}{\rho_2 h_2}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \nabla \cdot (h_2 V_2) = 0$$

で表わされる。1, 2 はそれぞれ淡水、海水をあらわす添字で、 V は流速、 h は各層の厚さ、 I は水面勾配、 τ_i は淡水、海水各層の間のせん断応力を示す。この式の誘導に当たっては、各層内で流速は鉛直方向に一樣、また流速の鉛直成分無視などの仮定がある。

二層流の問題を理論的に取り扱うには結局これらの方程式を境界条件にあわせて解けばよいのであるが、 τ_i

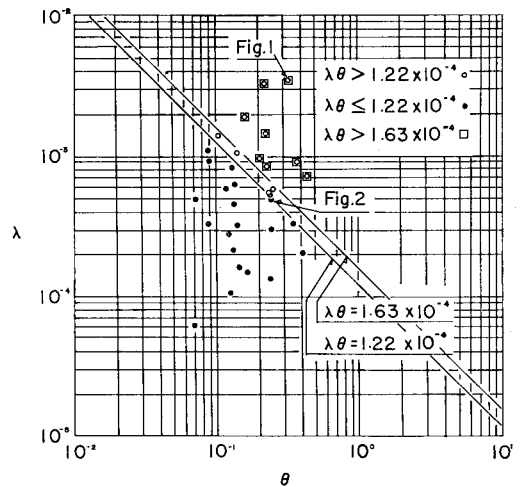
の形式が常に問題になる。塩水くさびの取り扱いでは

$$\tau_i = -\frac{f_i}{2} \rho |u_1 - u| (u_1 - u_2)$$

の形式がよく採用され、 f_i は Keulegan 数 θ ($\theta = (\nu \varepsilon g)^{1/3} / u_1$) の関数として扱われる。

この点を念頭におき、方程式中の諸量を考慮し、潮汐によって生ずる流況を扱う場合を考える。潮汐の周期を T_0 、振幅を A_0 、河口における淡水の時間的平均流速を U_0 にとると、これらの現象を支配する量は、 $A_0/U_0 T_0$ ($=\lambda$ とおく)、 F_i , R_e , U_0/C_i , θ (u_1 の代りに U_0 を用いる) などである。ここに F_i は内部 Froude 数、 R_e は Reynolds 数、 C_e は外部波速、 C_i は内部波速である。

理論的解決は数学的に困難であるので、これらのパラメーターに注目しつつ実験結果をまとめなければならない。現在、実験数がまだ十分多くはないので、すべてのパラメーターの寄与の度合を判定するまでには至っていないが、とりあえず λ と θ の二つのパラメーターのみによって実験結果をまとめてみることにしよう。



図—3 潮汐による流況変化の条件

● 順流 ○ 逆流
□ 逆流のうちの間欠流

図—3 にその結果を示す。これによると順流と逆流が $\lambda\theta = \text{const.}$ の線で明瞭に区別される。さらに逆流領域中に間欠流と、淡水の途切れることのない連続流との境も同じく $\lambda\theta = \text{const.}$ の線で区切られている。一応今のところこの実験装置のみの結果ではあるが

$\lambda\theta \leq 1.22 \times 10^{-4}$ 順流

$1.22 \times 10^{-4} < \lambda\theta \leq 1.63 \times 10^{-4}$ 逆流、連続流

$1.63 \times 10^{-4} < \lambda\theta$ " , 間欠流

のようにまとめることができる。

ただし λ と θ の両パラメーター中に用いた淡水の河口における流速 U_0 は、 $Q = bh_1 U_0$ (Q : 淡水流量, b : 川幅, h_1 : 淡水厚) と河口条件 $U_0^3 / \varepsilon g h_1 = 1$ とから、 $U_0 =$

$(\varepsilon g Q/b)^{1/3}$ として計算された値を用いている。したがって 図-3 において、かりに $\varepsilon \rightarrow 0$ の場合を考えると単純に順流領域に移行するのではなく、 $U_0 \rightarrow 0$ も成りたつので、むしろ逆流、間欠流領域へ移行する傾向をもつものである。

4. おわりに

潮汐による河口流出の flow-pattern の変化の状況と、順流、逆流、間欠流を発生する条件を実験の範囲内でとりまとめた。二層の密度差を種々変えたり、成層状態を変化させたりして、さらに実験を継続するつもりである。また実測による検証も今後に残されている。

この問題は最近多くの関心を集めている河川や水路の放出水による海水汚染と関連し、その実態把握のためには欠かせない基礎的研究につながるものであり、今後ともその実態を明らかにしていきたいと思う。

参 考 文 献

- 1) 柏村・吉田：河口を出る淡水の流れ，第13回海岸工学講演会講演集，昭 41.12月．
- 2) 柏村・吉田：Outflow pattern of fresh water issued from a river mouth, Coast. Eng. in Japan, Vol. 10, 1967.
- 3) 柏村・吉田：河口の flow pattern について，第12回水理講演会講演集，昭 43. 2 月．